

5. Workshop Kolbenverdichter

24. / 25. Oktober 2001

Praxisbericht

Beseitigung von Rohrleitungsschwingungen an Kolbenverdichtern

Dipl.-Ing. R. Görs, Dipl.-Ing. J. Steinhausen

Stadtwerke Rostock AG / KÖTTER Consulting Engineers

Inhalt:

1. Anlagenbeschreibung

2. Ausgangssituation

3. Problemlösung auf Basis einer messtechnischen Untersuchung

3.1 Angebotsphase

3.2 Das Projekt

3.2.1 Vorbereitung

3.2.2 Durchführung der meßtechnischen Untersuchung

3.2.3 Auswertung der Untersuchung

3.2.3.1 Druckpulsationen

3.2.3.2 Rohrleitungsschwingungen

3.2.3.3 Verdichterschwingungen

3.2.4 Bewertung der Gefährdung und Lösungsvarianten

4. Fazit

1. Anlagenbeschreibung

Unser Unternehmen, die Stadtwerke Rostock AG, beliefern die Stadt Rostock und das Umland mit Strom, Gas und Fernwärme, z. B. versorgen wir 2/3 der Haushalte von Rostock mit Fernwärme.

Auf dem Gelände der Stadtwerke Rostock AG in Marienehe befindet sich als Herzstück das 1996 übergebene Kombikraftwerk sowie 2 Heißwassererzeuger mit je 116 MW thermischer und 1 Heißwasserkessel mit 60 MW thermischer Leistung.

Das Kombikraftwerk ist aufgebaut in 3 Blöcke mit je einer Gasturbine mit 24 MW elektrischer Leistung und je einer Dampfturbine mit 13 MW elektrischer Leistung. Zusammen liefert das Kraftwerk eine thermische Leistung von 120 MW und eine elektrische Leistung von 111 MW.

Als Brennstoff für die 3 Gasturbinen wird Erdgas verwendet.

Die Gasturbinen benötigen vor den Regelventilen einen Vordruck für Erdgas von 24 bar, d. h. der volle Regelbereich der Gasturbinen ist zwischen 21 und 25 bar gegeben. Im Bereich von 19,5 bis 21,0 bar erzielen wir 80 % der Gasturbinenlast, unterhalb von 19 bar erfolgt der Ausfall der Gasturbinen.

Bis zum Jahr 2000 benötigten die Stadtwerke noch eine Verdichterstation zur Druckerhöhung von Erdgas zur Speisung der Gasturbinen.

Zur Verdichtung des Erdgases sind in der Gasverdichteranlage 3 Kolbenverdichter aufgestellt (nachfolgend auch mit Verdichter A, B und C bezeichnet). Die Verdichterstation ist als Kompaktanlage ausgeführt. Jeder Verdichter besteht aus einem saug- und druckseitigen Pulsationsdämpfer, Absperrungen, Entspannungsventil, Sicherheits- und Rückschlagventil, Antriebsmotor, Hoerbiger Ventilregelung, der Ölversorgung, den Gas-, Wasser- und Luftleitungen, der Regelung und dem dazugehörigen Schaltschrank. Allen 3 Verdichtern dient ein gemeinsamer Bypass bestehend aus einem Kühler und einem elektropneumatischen Regelventil mit Handabsperrearmaturen. Die Verdichter sind in einem separaten Gebäude aufgestellt. Dieses Gebäude dient neben dem Schutz der Aggregate vor Witterungseinflüssen auch der Einhaltung der für den Standort Marienehe geforderten Schallemissionswerte. Das je nach Lastfall von bis zu 2 Verdichtern gemeinsam verdichtete Gas wird über die zusammengeführten Gasrohrleitungen auf einen Pufferbehälter gefördert. Dadurch wird ein gleichmäßiger Vordruck für die Gasturbinenanlagen gewährleistet. Bei Ausfall eines Verdichters wird automatisch der Reserveverdichter in Betrieb genommen, so daß bei kurzzeitigem Leistungsrückgang der Pufferbehälter die Gasturbine versorgt und diese stabil in

Betrieb bleibt. Der Pufferbehälter ist außerhalb des Verdichtergebäudes aufgestellt. Die Schaltschränke für jeden Verdichter und der Masterschaltschrank stehen in einem separaten freien Raum. Bei einem hohen Gasvordruck, können über eine separate Bypassleitung die Turbinen mit Gas versorgt werden (Verdichteranlage ist außer Betrieb). Diese Bypassleitung führt von der kundenseitigen Gasreduzierstation direkt zum Pufferbehälter.

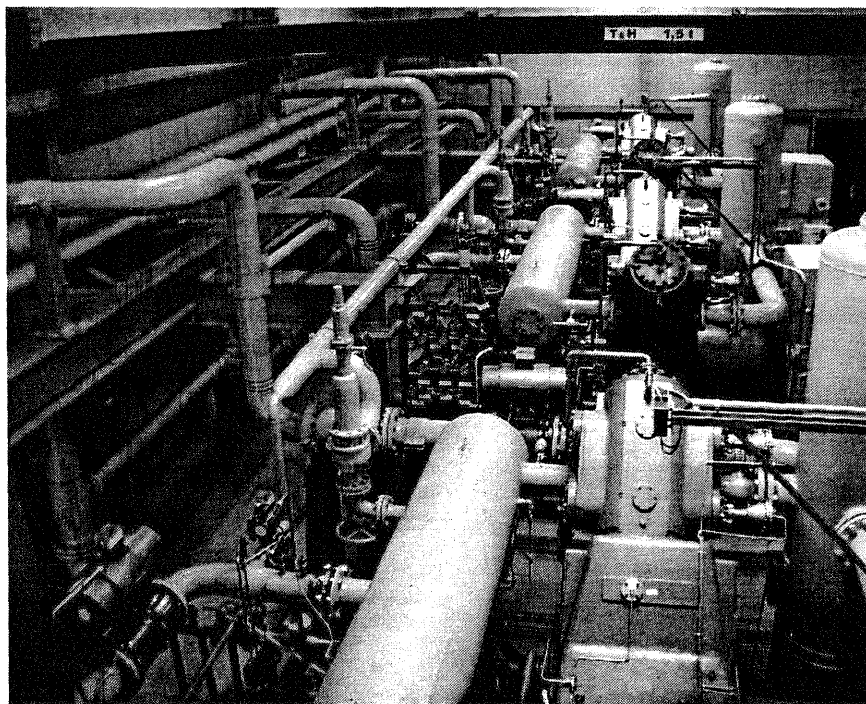


Bild 1: Verdichteranlagen der Stadtwerke Rostock AG, im Vordergrund Verdichter A

Die Kolbenverdichter, hergestellt von der Firma Neumann & Esser GmbH, sind einstufige Maschinen mit je 2 doppelt wirkenden Zylindern in V-förmiger Bauart. Die maximale Leistung eines Verdichters beträgt 528 kW. Die konstante Drehzahl der Verdichter liegt bei 740 U/min. Als Antrieb dient jeweils ein ABB Asynchronmotor mit 550 kW. Die maximale Liefermenge je Verdichter beträgt 12300 Nm³/h.

Die 3 installierten Verdichter arbeiten nach folgender Fahrweise: Bei Anlagenlasten bis 30 % wird der geförderte Volumenstrom über ein Bypassregelventil geregelt. Lediglich ein Verdichter ist in Betrieb. Bei einer Last von über 30 % wird der Volumenstrom bei einfach wirkender Fahrweise der Zylinder im Bereich zwischen 30 % bis 50 % und bei doppelt wirkender Fahrweise im Bereich zwischen 50 % und 80 % mittels der Hoerbiger Ventilabhebung geregelt. Bei einer Leistungsabnahme größer als 80 % erfolgt die Zuschaltung eines zweiten Verdichters.

2. Ausgangssituation

Die anfänglichen, gleich nach Inbetriebnahme auftretenden Schwingungen an der der Gasverdichteranlage vorgeschalteten Verrechnungsmessung wurden durch die Errichtung eines zusätzlichen akustischen Filters kompensiert.

Auch im Gebäude sind unmittelbar nach Inbetriebnahme starke Schwingungen aufgetreten. Dies betraf hauptsächlich die Hauptleitungen bzw. Sammelleitungen zu den Verdichtern, als auch die gesamte Stahlkonstruktion innerhalb des Verdichtergebäudes. Zur Beseitigung dieser durch Schwingungen hervorgerufenen Bewegungen der Gasrohrleitungen, wurden die bestehenden Konstruktionen mittels Anbringen von zusätzlichen Verstrebrungen an die vorhandene Stahlkonstruktion versteift. Diese willkürlich zusätzlich montierten Verstrebrungen erbrachten eine Besserung in der Stabilität der Konstruktion zur Aufnahme der Rohrleitung bzw. den Sammelleitungen. Das eigentliche Problem der Schwingungen wurde nicht beseitigt, sondern nur in das System hinein verlagert. Dieser Zustand hielt bis zum April 1998 an.

Zu diesem Zeitpunkt trat eine Schadenhäufung an der gesamten Verdichteranlage auf. So waren an allen Saugrohrleitungen der Verdichter A, B und C gebrochene Schellen oberhalb der Schweißnaht an der A-Stütze festzustellen. Weiterhin kam es zum Lösen von Flanschverbindungen an der Saug- und Druckseite. Außerdem kam es zum Lösen von Schraubverbindungen von Messleitungen z. B. Differenzdruckmessung, Pufferbehälter Saugseite Verdichter A. Dies führte u. a. auch zum Verdichterausfall. Lose Schraubverbindungen von Pneumatikleitungen bis zur vollständigen Trennung der Verbindungen z. B. Steuerluftleitung Verdichter B, oder durch Schwingbruch herabgefallene Alarmlampen beim Verdichter B, waren weitere

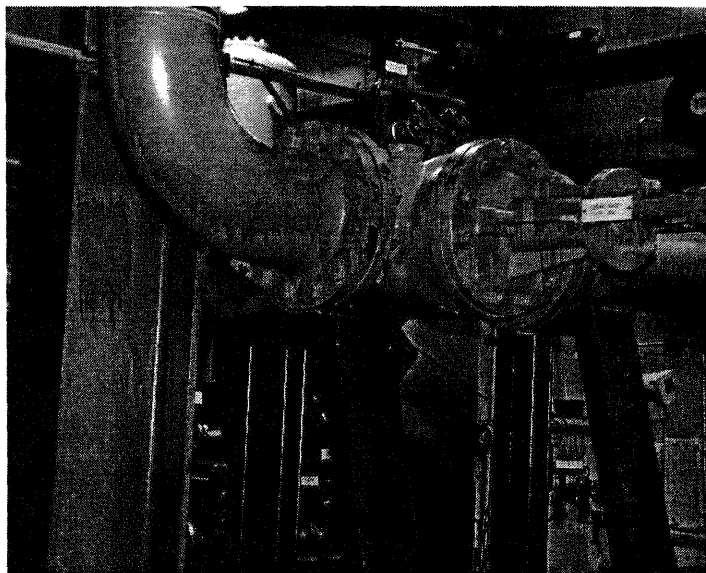


Bild 2: Gebrochene Schelle an der Saugleitung Verdichter A

Schädigungen. Außerdem erfolgte eine Reißbildung in einem Kugelhahn vor dem Verdichter A. Zu diesem Zeitpunkt hatten die Verdichter A und C eine Laufleistung von ca. 9200 Betriebsstunden und der Verdichter B eine Laufleistung von ca. 4300 Betriebsstunden.

Die von uns festgestellten o. g. Schäden wurden unverzüglich an die Fa. Neumann & Esser weitergeleitet. Die Fa. Neumann & Esser wurde aufgefordert, den Betriebszustand so schnell wie möglich zu stabilisieren. Die Reaktion war ein Besuch vor Ort mit einer durchgeführten Schwingungsmessung. Es wurde festgestellt, daß die Schwingungen in allen Bereichen innerhalb der zulässigen Werte (VDI 2056) lagen. Weiterhin wurden einige Vorschläge zur Änderung der Traversenkonstruktion angeführt.

Parallel dazu wurde von uns KEMA IEV als unabhängiges Unternehmen mit der Schadensursachenermittlung in Verbindung mit den Schwingungen an der Verdichteranlage beauftragt. Hierzu wurde eine detaillierte Schwingungsmessung durchgeführt, welche als Ergebnis die Messung der Schwinggeschwindigkeit als Effektivwert und eine Einordnung der Maschinen nach DIN ISO 10816 hatte. Weiterhin wurde anhand der Frequenzspektren belegt, daß die 2n-Anteile (2. Ordnung der Drehzahl) 24,8 Hz am Maschinensatz 3 bis 4 mal größer und an der Rohrleitungskonstruktion 8 bis 14 (50) mal größer als die 1n Komponente (1. Ordnung) waren und das im Vergleich mit der Literatur die Druckpulsationen in den Rohrleitungen Hauptanregungsmechanismen für diese Schwingungen waren.

Ebenso wie von der Fa. Neumann & Esser empfohlen, empfahl uns auch KEMA IEV, in ihrem Gutachten den Dauerbetrieb bzw. ein Betrieb über längeren Zeitraum unter den gegebenen Bedingungen nicht weiter zu führen. Darüber hinaus wurde uns in dem Bericht von KEMA IEV zur Entkopplung der Anregungsmechanismen der Einsatz von Pulsations-Dämpferplatten nach dem Kötterprinzip empfohlen.

Der der Auswertung beigefügte Artikel der Fachzeitschrift „3R-International“ zur Pulsations- und Schwingungsminderung mit Pulsations-Dämpferplatten nach dem Kötterprinzip hatte die Kontaktaufnahme zu dem Unternehmen "Kötter Beratende Ingenieure" zur Folge.

3. Problemlösung auf Basis einer umfassenden messtechnischen Untersuchung

3.1 Angebotsphase

Auf die empfohlenen Pulsations-Dämpferplatten angesprochen, zeigte man sich im Hause Kötter sehr interessiert an unseren Problemen und schlug daraufhin ein unverbindliches Treffen vor Ort vor, um sich einen ersten Überblick über die bei uns befindlichen Anlagen zu verschaffen.

Nach der entsprechenden Schilderung unseres Problems sowie auf der Grundlage der bei einem ersten Besuch gewonnenen Anlagenkenntnisse der Fa. Kötter Mitte Mai 1998 bei den Stadtwerken in Rostock erhielten wir binnen einer Woche ein detailliert untersetztes Angebot über die Untersuchung der Pulsationen und Schwingungen beim Betrieb der Druckerhöhungsverdichter.

Folgende Ziele wurden mit der Untersuchung verfolgt:

- > Ermittlung der Ursachen für die aufgetretenen Schäden,

- > Ermittlung von bestehenden Gefährdungen,
- > Erhöhung der Betriebssicherheit und der Standzeiten der betreffenden Anlagenteile und
- > Unterbreitung von Lösungsvorschlägen zur Beseitigung der vorliegenden Ursachen.

Durch Beobachtungen von uns, als Betreiber, und aufgrund der Auswertung der ersten Untersuchungen von KEMA IEV, wurde vermutet, dass als Ursache für die Schäden Schwingungen zu nennen sind, welche durch Druckpulsation innerhalb der Rohrleitungen angeregt werden. Basierend auf diesen Annahmen und ersten Ergebnissen, wurde seitens der Fa. Kötter folgende Vorgehensweise vorgeschlagen:

- > Zeitgleiche Erfassung der tatsächlich vorhandenen Gaspulsationen innerhalb der Rohrleitungen und der mechanischen Rohrleitungsschwingungen an mehreren Messpunkten bei unterschiedlichen Betriebspunkten der Verdichteranlage. Im Rahmen der Vorbereitung wird gemeinsam mit dem Betreiber die Festlegung der Meßpunkte als auch die Prüfung von vorhandenen Meßstutzen für die Eignung zur Druckpulsationsmessung vorgenommen.
- > Vergleich der in den Messungen erfaßten tatsächlichen Situation mit den zulässigen Werten gemäß API Standard 618. Neben der Darstellung der Wirkmechanismen, die zu überhöhten Pulsationen und/oder Rohrleitungsschwingungen führen, erfolgt eine Beschreibung von realisierbaren Lösungsansätzen unter Einbeziehung betriebswirtschaftlicher Kriterien.
- > Die Vorlage der Ergebnisse der Untersuchungen in Berichtform.

3.2 Das Projekt

Das von uns in Auftrag gegebene Untersuchungsprojekt umfaßte im Detail:

3.2.1 Vorbereitung

Für eine gut funktionierende Meßwertaufnahme, ist eine sorgfältige Vorbereitung unabdingbar. Von den Stadtwerken Rostock AG wurden durch die Fa. Kötter diverse Zeichnungen (Aufstellungs-, Geländepläne, Rohrleitungsisometrien u.a.) und Unterlagen (Datenblätter zu den Kolbenverdichtern) abgefordert, um sich ein genaues Bild vom technischen Stand der Verdichteranlage machen zu können. Die Planungsphase war weiterhin gekennzeichnet durch die Ermittlung aller für die Messungen bzw. Berechnungen erforderlichen Parameter, die Abstimmung der Meßpunkte sowie auch zusätzliche erforderliche Vorbereitungsarbeiten seitens der Stadtwerke Rostock AG (z. B. Schaffung von zusätzlichen Meßstellen). Für uns als

Betreiber der Anlage stellte sich einmal mehr heraus, wie wichtig eine ordentlich geführte, lückenlose Anlagendokumentation ist.

3.2.2 Durchführung der meßtechnischen Untersuchung

Die Pulsations- und Schwingungsmessungen erfolgten im Zeitraum vom 17.06.1998 bis 19.06.1998. Für die Messungen wurde folgende Hardware verwendet: Ein Oszilloskop (Typ 2214, Tektronix), Frequenzanalysator (Typ PL202, Diagnostic Instruments), ein Vibrationanalyser (Typ 2514, Brüel & Kjaer), Ladungsverstärker (Typ 2635, Brüel & Kjaer) und ein Meßwerterfassungsrechner mit DSP-Board. Die Sensortechnik war bestimmt durch Druckaufnehmer (Typ 7061 A/B, Kistler) und Beschleunigungsaufnehmer (Typ 4371, Brüel & Kjaer).

Sowohl die Druckpulsationen als auch die Rohrleitungsschwingungen wurden an verschiedenen Meßpunkten der Verdichteranlage (einschließlich im Bereich der Saugleitungen, Druckbehälter und Armaturen) erfasst.

Einen Überblick zur Positionierung der Sensoren ist Bild 3 zu entnehmen, das die Meßpositionen stellvertretend an einem der Verdichter zeigt. Die Schwingungsmesspunkte sind mit einem vorangestellten „S“ und die Druckmesspunkte mit einem „P“ gekennzeichnet.

Die aufgenommenen Versuchsreihen mit den dazugehörigen Betriebsbedingungen sind der Tabelle 1 „Betriebsbedingungen“ zu entnehmen.

3.2.3 Auswertung der Untersuchung

Innerhalb eines sehr kurzen Zeitraumes, (1 Woche nach Abschluß der Meßwertaufnahme) erreichte uns als Kunden eine erste Einschätzung zur Datenanalyse und zur Interpretation der Meßwerte. Vier Wochen im Anschluß erhielten wir dann den sehr ausführlichen und fundierten Abschlußbericht.

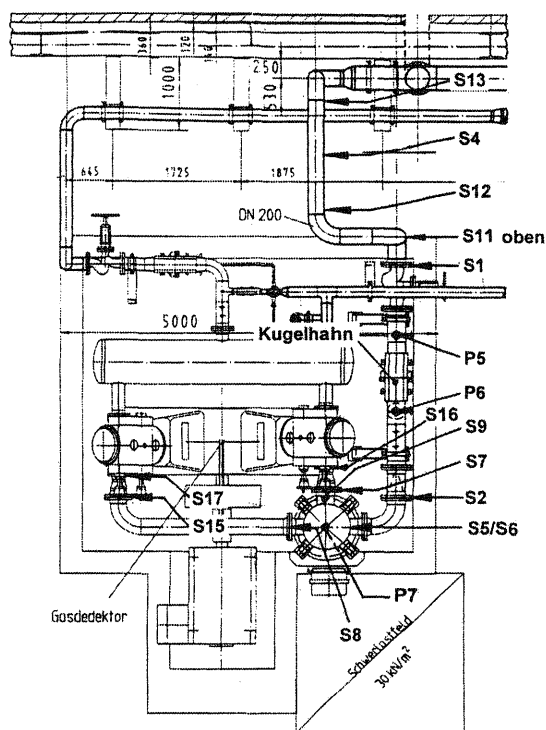


Bild 3: Lage und Bezeichnung der Messpositionen an einem Verdichter

Für die Beurteilung der Druckpulsationen sind die Spitze - Spitze Werte der Messung mit den max. zulässigen Werten des API Standards 618 verglichen worden. Die Rohrleitungsschwingungen sind anhand der Werknorm des Verdichterherstellers Neumann & Esser beurteilt worden, diese stellt eine Erweiterung der VDI 2056 dar. Die am Verdichter gemessenen effektiven Schwingschnellen wurden anhand der DIN – ISO 10618 Teil 1 und Teil 6 überprüft.

3.2.3.1 Druckpulsationen

Die Richtwerte der API 618 wurden bei den Druckpulsationen in den saugseitigen Rohrleitungen der Kolbenverdichter bei den Betriebszuständen mit doppelt wirkenden Zylindern (A2, A3, B3 vergleiche auch Tabelle 1 „Betriebsbedingungen“) deutlich unterschritten. Bei den untersuchten Betriebszuständen mit einfach wirkenden Zylindern (A1, B1 und C1) wurden die Richtwerte der API 618 zum Teil geringfügig überschritten.

Versuch	Verdichter	Last [%]	P_{1000} [bar ü]	t_{1000} [°C]	P_{RMS} [bar U]	t_{RMS} [°C]	Bemerkung
A1	A	37,4	18,5	13,2	24	64,6	- ¹⁾
A2	A	55,4	18,5	17,8	24	59,6	-
A3	A	76,8	18,5	22,1	24	58,2	-
B1	B	36,7	18,6	12,8	24	63,6	-
B1mod(A)	B	36,3	18,7	13,0	24	63,8	Kugelhahn 00EKH10AA501 Saugseite Verdichter A geöffnet
B3	B	77,7	18,6	22,5	24	58,5	-
B3mod(A)	B	77,7	18,6	22,5	24	58,5	Kugelhahn 00EKH10AA501 Saugseite Verdichter A geöffnet
C1	C	33,5	18,6	12,7	24	65,9	-
C1mod(A)	C	32,7	18,6	12,6	24	69,6	Kugelhahn 00EKH10AA501 Saugseite Verdichter A geöffnet
C1mod(B)	C	32,7	18,6	12,6	24	69,6	Kugelhahn 00EKH20AA501 Saugseite Verdichter B geöffnet
AB1	A + B	38,4 / 38,2	18,6	22,9	24	69,5	beide Verdichter laufen

¹⁾ Im Regelfall sind die saugseitigen Kugelhähne vor den nicht aktiven Verdichtern geschlossen.

Tabelle 1: Betriebsbedingungen

Als Ursache hierfür konnte eine akustische Resonanz innerhalb der Rohrleitungen ermittelt werden, welche bei einer Frequenz von 12,4 Hz zu einer erhöhten Druckamplitude führt.

Beispielhaft für die durchgeführten Messungen sind in Bild 4 die Amplituden der Druckpulsationen am Meßpunkt P5 des Verdichters B (P5B) für die Signalanteile mit einer Pulsationsfrequenz von 12 Hz und 24 Hz für verschiedene Anlagen- und Betriebszustände graphisch dargestellt. Zum Vergleich sind am rechten Rand des

Diagramms die für die Frequenzkomponenten zugehörigen Richtwerte der API 618 eingetragen. Es ist zu erkennen, dass eine Abhängigkeit der Pulsation der 12 Hz Komponente von der Anlagenlast besteht, d.h. je nachdem ob der Verdichter einfach wirkend (12 Hz Anteil groß) oder doppelt wirkend (12 Hz Anteil klein) betrieben wird. Die Amplituden der 24 Hz Komponente sind dagegen weitgehend unabhängig von der Fahrweise des Verdichters.

Meßpunkt P5 - Verdichter B

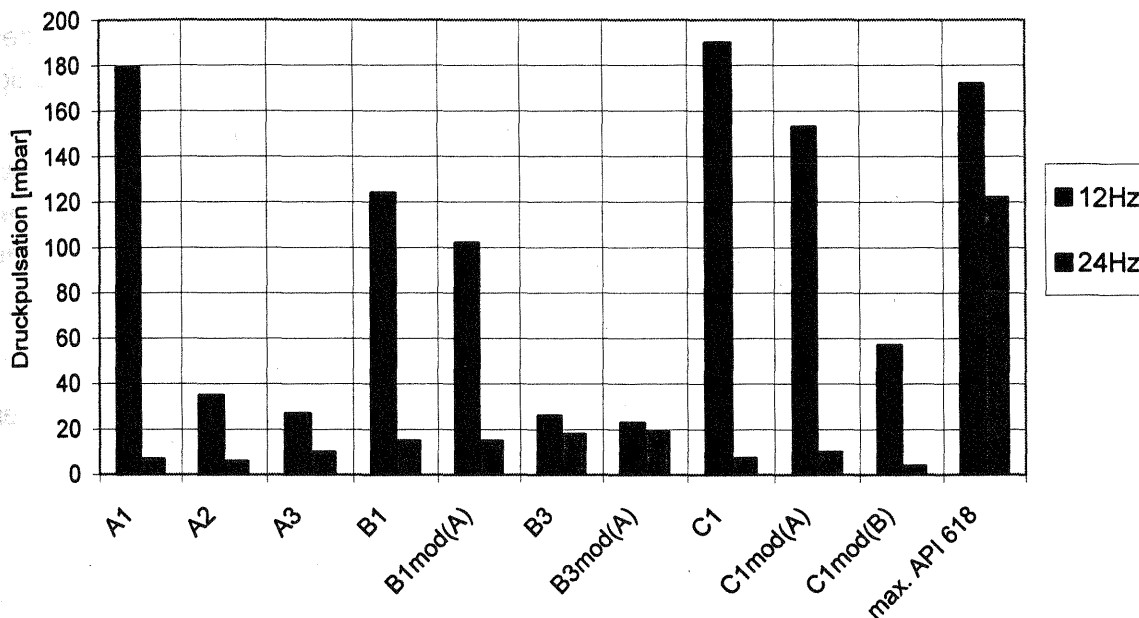


Bild 4: Amplituden der Druckpulsationen bei 12 Hz und 24 Hz für verschiedene Betriebszustände der Anlage nach Tabelle 1.

3.2.3.2 Rohrleitungsschwingungen

Die Analyse der umfangreichen Meßwerte zu den mechanischen Rohrleitungsschwingungen hat für die gemessenen Schwingschnellen der saugseitigen Rohrleitung der Verdichter A, B und C eine zum Teil deutliche Überschreitung der Richtwerte ergeben.

Im Vergleich zu den Verdichtern A und B sind die Schwingschnellen am Verdichter C kleiner. Die Transformation der Schwingungen in den Frequenzbereich durch eine harmonische Analyse der Zeitsignale führt zu dem Ergebnis, daß die Größe der Schwingschnellen von der 24 Hz Komponente dominiert wird. Diese nimmt mit zunehmender Anlagenlast zu. Der Anteil der 12 Hz Komponente ist im Verhältnis zur 24 Hz Komponente sehr gering. Der Vergleich mit den gemessenen Druckpulsationen zeigte, daß

1. die Schwingungen der Rohrleitungen von der 24 Hz Komponente bestimmt werden, während die Druckpulsationen durch die 12 Hz Komponente dominiert werden,
2. die Druckpulsationen mit erhöhter Anlagenlast abnehmen, die Rohrleitungsschwingungen jedoch zunehmen und
3. das versuchsweise Öffnen der saugseitigen Kugelhähne an den nicht in Betrieb befindlichen Verdichtern zur Abnahme der Druckpulsationen führt.

Ein ursächlicher Zusammenhang zwischen den Druckpulsationen und den überhöhten mechanischen Rohrleitungsschwingungen konnte somit nicht bestätigt werden.

3.2.3.3 Verdichterschwingungen

Die an den Verdichtern A und B beim Betriebszustand AB1 nach Tabelle 1 gemessenen effektiven Schwingschnellen ergaben keine Überschreitung des für den Dauerbetrieb zulässigen Grenzwertes von 28,2 mm/s.

3.2.4 Bewertung der Gefährdung und Lösungsvarianten

Die Bewertung der Gefährdung und die Lösungsansätze sind für einen Betreiber einer Anlage mit Schwingungsproblemen die primären Ergebnisse, welche er erwartet. Dies ist das Ziel der Untersuchung, das sind die Antworten auf die Fragen, worauf der Betreiber „lauert“. Denn die zu verwirklichenden Varianten der Schwingungsbeseitigung und das wirkliche Gefährdungspotential, was von den Schwingungen ausgeht, ist entscheidend für das Instandhaltungsbudget und genießt für die Zukunft der Betriebsweise einer solchen Anlage oberste Priorität.

Im Ergebnis der messtechnischen Untersuchungen hat sich eindeutig herausgestellt, daß eine unmittelbare Gefährdung der Anlage infolge der erhöhten effektiven Schwingschnellen nicht besteht. Die Anlage ist als dauerhaft einzustufen. Auch wenn bei der Anlage nur ein geringes Gefährdungspotential vorlag, wurde uns seitens Fa. Kötter empfohlen, die Rohrleitungsschwingungen zu reduzieren.

Da ein eindeutiger Zusammenhang zwischen den Druckpulsationen innerhalb der saugseitigen Rohrleitungen und den Rohrleitungsschwingungen nicht festzustellen war, war es nicht empfehlenswert Maßnahmen zu ergreifen, welche eine

Reduzierung der Druckpulsationen innerhalb der saugseitigen Rohrleitung zum Inhalt hatten, um damit eine Verkleinerung der Rohrleitungsschwingungen zu erreichen.

Von der eben genannten Aussage ausgehend und an Hand der Analyse der Bewegungsformen der saugseitigen Anlagenschwingungen sowie unter Beachtung der Ziele

- > Verschiebung der Eigenfrequenzen der Rohrleitungsabschnitte im Bereich des Meßpunktes S1 zu höheren Frequenzen,
- > Vergrößerung der mechanischen Dämpfung und
- > Unterbrechung der Übertragungskette der Schwingungsanregung an geeigneter Stelle

wurden insgesamt 4 Lösungsvarianten mit verschiedenen zu realisierenden Maßnahmen vorgeschlagen und gleichzeitig in einer Kosten-Nutzen-Übersicht verglichen.

	Wirkung	Installationsaufwand	Kosten
Variante 1 (Kompensatoren und Stützen)	gut	mittel	mittel
Variante 2 (Kompensatoren und Dämpfer)	sehr gut	hoch	hoch
Variante 3 (Rohrleitungsänderung und Stützen)	gut	hoch	sehr hoch
Variante 4 (Tilger und Stützen)	mittel	gering	mittel

Tabelle 2: Kosten-Nutzen-Übersicht der Lösungsvarianten

In Übereinstimmung mit den Empfehlungen der Fa. Kötter und im Hinblick auf die zukünftige Einsatzweise der Verdichteranlage erschien es uns als Betreiber am effizientesten und wirtschaftlichsten, uns für die Lösungsvariante 1 zu entscheiden. Der zugehörige Maßnahmenkatalog wurde gemäß der nachstehenden, vorgeschlagenen Details im August/September 1998 realisiert:

1. Die saugseitigen Rohrleitungen wurden jeweils im Bereich des Meßpunktes S4 durch eine massive Stütze an den I-Träger befestigt, mittels der vorgeschlagenen Variante der Rohrleitungsbefestigung.
2. Befestigung der saugseitigen Rohrleitungen der Handarmaturen im Bereich des Meßpunktes S1 durch eine massive Stütze an dem jeweils dort verlaufenden vertikalen I-Träger.
3. Ersatz der dünnen Schellen der saugseitigen Rohrleitungsbefestigungen durch massive Schellenkonstruktionen.

4. Erneuerung bzw. Verbesserung der vorhandenen Verankerung an den saugseitigen Rohrleitungsstützen, d. h. bessere Anbindung an das Betonfundament.
5. Entfernung bestehender Verbindung zwischen Förder- und Saugleitung, somit Schaffung einer Entkopplung.
6. Drehung der Handarmatur unmittelbar nach dem Meßpunkt S1 um 90 °, damit die Spindel vertikal verläuft.

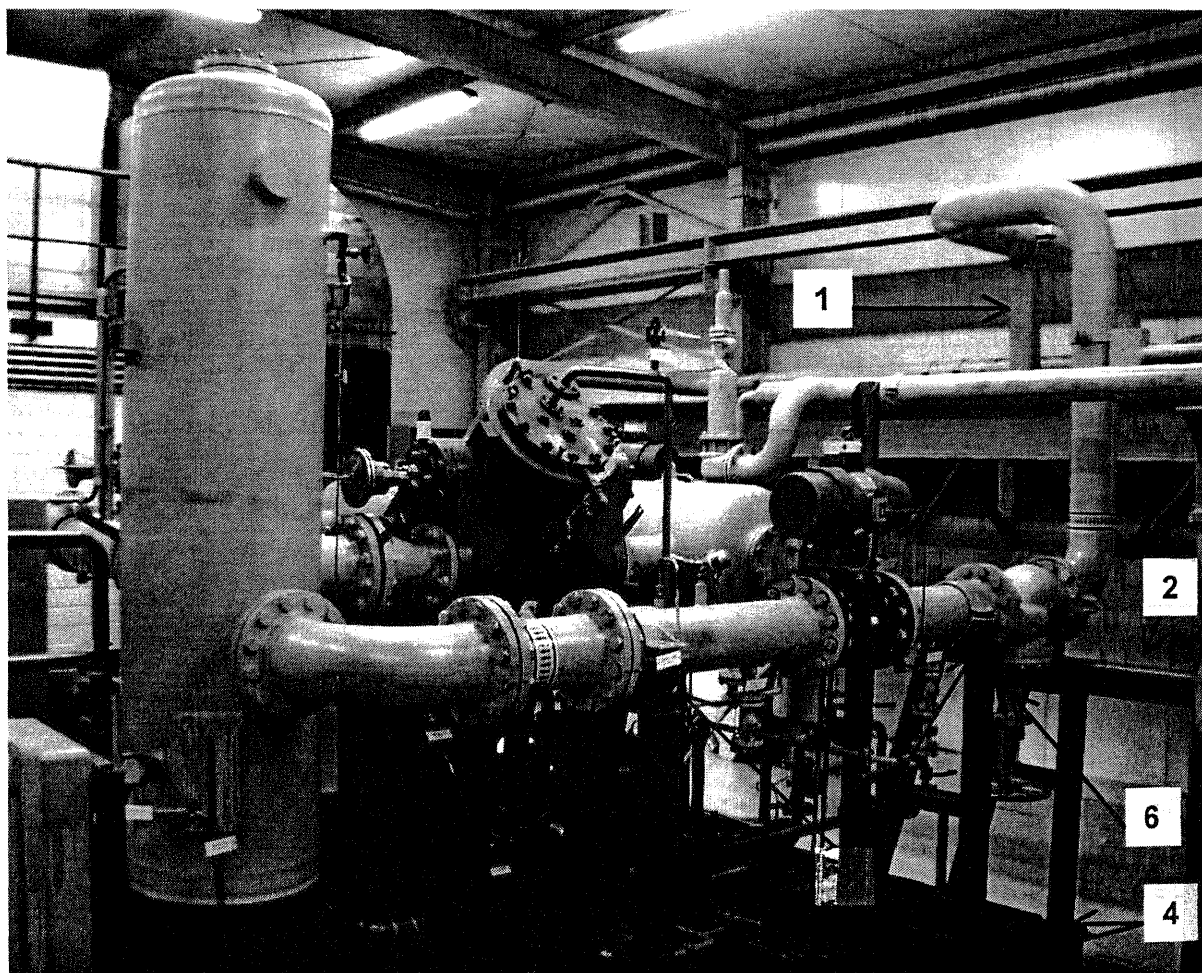


Bild 5: Saugrohrleitung des Verdichters A nach dem Umbau (Realisierung der Maßnahmen der Variante 1)

Die als zusätzliche Erstmaßnahme der Lösungsvariante 1 empfohlene Installation von Schwingungskompensatoren am Eintrittsflansch der saugseitigen Pulsationsbehälter zur Verhinderung der Anregungen der Saugrohrleitungen wurde seitens des Betreibers aus wirtschaftlichen Gründen nicht realisiert.

Durch die gezielte und exakte Bestimmung der Lage der zu verändernden Konstruktionen führten auch die vorher genannten Maßnahmen zur Beseitigung der Rohrleitungsschwingungen.

4. Fazit

Den Entschluß, eine Untersuchung der Druckpulsationen und Schwingungen durchführen zu lassen, muß in das Instandhaltungskonzept eines jeweiligen Betreibers passen. Die Ergebnisse sind dabei als Empfehlung zu betrachten, wobei die Entscheidung zu den jeweils durchzuführenden Maßnahmen abhängig von den wirtschaftlichen Faktoren und von dem Betriebsregime des jeweiligen Unternehmens sind.

Für uns als Betreiber stellte sich diese Untersuchung als Entscheidungshilfe zur Realisierung von Veränderung an der Verdichteranlage dar, um die Eingangs des Berichts erwähnten Schädigungen an den Bauteilen zu vermeiden und um der Verantwortung nach einer betriebssicheren Fahrweise gerecht zu werden. Da auch jeder vorgeschlagene Lösungsansatz meßtechnisch begründet wurde, gelang uns somit ein "Volltreffer" bei der Beseitigung der Rohrleitungsschwingungen und ersparte uns somit den erheblichen zeitlichen Aufwand des Experimentierens.